Iranian Food Science and Technology
Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 20, No. 1, Mar.-Apr. 2024, p. 85-99

Heat Transfer Modeling of Malt Syrup in Semi-rigid Aluminum Based Packaging

S. Hamidi[1], N. Zamindar[2*], N. Gholipour Shahraki[3]

1 and 2- Gratuated Master and Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: n.zamindar@khuisf.ac.ir)
3- Ph.D. Student, Department of Food Science and Technology, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

Dates		How to cite this article:
Received:	14.09.2022	Hamidi, S., Zamindar, N., & Gholipour Shahraki, N. (2024). Heat transfer modeling of malt syrup in semi-rigid aluminum based packaging. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *20*(1), 85-99. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.78801.1205
Revised:	23.01.2023	
Accepted:	06.03.2023	
Available Online:	07.03.2023	

Introduction

Thermal processing is an important method of canned food production (Farid & Abdul Ghani, 2004). Estimation of the heat transfer rates is essential to obtain optimum processing conditions and to improve product quality. In addition, a better understanding of the mechanism of the heating process will lead to an improved performance in the process and to some energy savings (Abdul Ghani *et al*., 1999). Computational fluid dynamics (CFD) is an efficient way to study flow behavior and temperature distribution of thermal processing in the food technology (Ghani *et al*., 2003). As the semi-rigid aluminum packaging market recently has been introduced, there is limited information about the temperature distribution during the heating process of such containers. In this paper the temperature distribution was predicted and location of cold zone was determined. The effect of headspace (air and water vapor) in heat transfer mechanism was investigated.

Materials and Methods

Physical properties

Malt extract properties such as density, specific heat, thermal conductivity and viscosity values are necessary for the equations solution. Viscosity and density of the sample was measured as a function of temperature (Vatankhah et al., 2015). Specific heat and thermal conductivity of sample were estimated using the mass fraction of its constituents. For simulation, the experimental results were applied by piecewise-linear method in the material part of the software to describe viscosity, thermal conductivity and specific heat.

Experimental methodology

For the experimental, a thermocouple probe was located at point (0, 0, -2.76) in a semi rigid aluminum based packaging to measure the temperature distribution inside the container. Then the package was filled with malt extract (°Brix ~ 60) and then the package was sealed at 280 °C using Alcan machine. Another thermocouple was placed near the containers, in the water cascading Barriquand steriflow retort. The thermocouples were attached to Ellab data logger by PT100 cables. The data logger was connected to a personal computer and E-val 2.1 software was used to export time temperature profile of each thermocouple in 1 min intervals.

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.78801.1205

Geometry and meshing

Gambit 2.3.30 was used to develop geometry and set of grid (0.2 cm, and 0.1 cm mesh size) was performed. Then software of fluent 6.3.26 with 3-D, double precision, pressure-based solver, implicit formulation, unsteady time, laminar flow was applied to solve the system of the governing equations (Vatankhah et al., 2015).

Boundary conditions and initial values

Unsteady temperature function was imposed to all faces of the geometry in 1 min time intervals. No-slip boundary condition was supposed for velocity components relative to boundaries. The boundary conditions used at top surface, bottom surface and side walls included: T = Tw, Vx = 0, Vy = 0 and Vz = 0. The initial temperature was assumed as the first temperature which was measured by the thermocouple at the starting time of processing.

Solution methodology

Fluent software was used to solve the Navier-Stokes and energy equations simultaneously. A preset convergence limit of 10^{-3} for continuity and momentum equations and 10^{-8} for the energy equation were used, in order to achieve an appropriate convergence. The under-relaxation factors were adjusted smaller than 1 to obtain a good convergence of the numerical solution. SIMPLEC algorithm was used for pressure-velocity coupling.

Results and Discussion

There was no significant difference between predicted and experimental temperatures for point (0, 0, -2.76) in models with and without head space using t-test ($p<0.01$). Temperature contours of predicted models (with headspace) were similar to model without headspace at the different stages of the process. Simulation result showed slowest heating zone located in (0.02 $<X<$ 0.8, -1 $<Y<$ 0.3 and -3.27$<Z<$ 3.27) for model of malt extract with headspace and in (-3.58 $< X<$ 3.76, -3.44 $<Y<$ 0.48 and -3.46 $<Z<$ -3.05) for model of malt extract without headspace.

Conclusion

The heating process of malt extract in semi rigid aluminum container during thermal processing was simulated successfully using CFD. The CFD based model showed that the position of SHZ was located in the third end of the container.

Keywords: Computational fluid dynamics, Malt extract, Semi rigid aluminum container, Slowest heating zone

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۳ ص. ۹۹-۸۵

مدل‌سازی انتقال حرارت در کنسرو حاوی عصاره مالت در بسته‌بندی نیمه‌سخت بر پایه آلومینیوم

سعیده حمیدی[۱]– نفیسه زمین‌دار [۲*]– نیره قلی‌پور شهرکی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

چکیده

در این پژوهش مدل عددی انتقال حرارت در کنسرو عصاره مالت با بریکس ۶۰ در بسته‌بندی آلومینیومی نیمه‌سخت با نرم‌افزار فلوئنت توسعه داده شد. شکل هندسی کنسرو حاوی نمونه، توسط نرم‌افزار گمبیت رسم و شبکه‌بندی مناسب با فاصله گره‌های ۰/۱cm و ۰/۲cm اعمال شد. سپس انتقال حرارت درون کنسرو در طول فرآیند حرارتی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شد. پروفیل‌های دمایی فرآیند حرارتی، شکل و محل ناحیه کند حرارتی در کنسرو نمونه بررسی شد. همچنین تأثیر وجود سرفضا (فضای خالی بالای ظرف) بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت. شبکه‌بندی مناسب برای شبیه‌سازی، شبکه با فاصله گره‌های ۰/۲cm بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که محل ناحیه کند حرارتی در کنسرو عصاره مالت دارای سرفضا در پایان مرحله حرارت‌دهی در محدوده ‎-۳/۳۷<Z<-۳/۲۷cm، ‎-۱<Y<۰/۳cm، ‎-۰/۰۲<X<۰/۸cm و در مدل فاقد سرفضا در پایان مرحله حرارت‌دهی در محدوده ‎-۳/۴۶<Z<-۳/۰۵cm ، ‎-۳/۴۴<Y<۰/۴۸cm، ‎-۳/۵۸<X<۳/۷۶cm است. بین دماهای پیش‌بینی شده و دماهای حاصل از تکرارهای آزمایشگاهی در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. پروفیل‌های دمایی حاصل از شبیه‌سازی در حالت‌های دارا و فاقد سرفضا در مراحل مختلف فرآیند حرارتی دارای مشابهت قابل قبولی بودند.

واژه‌های کلیدی: بسته‌بندی آلومینیومی نیمه انعطاف‌پذیر، دینامیک سیالات محاسباتی، عصاره مالت، ناحیه کند حرارتی

مقدمه

اغلب عملیات‌های فرآوری مواد غذایی جهت افزایش عمر مفید محصول از طریق حذف فعالیت نامطلوب میکروبی طراحی شده‌اند. بیش از یک قرن است که فرآیند حرارتی در تولید غذاهای کنسرو شده با عمر ماندگاری بالا نقش بسزایی دارد. شناخته شده‌ترین عملیات فرآوری که در آن انرژی حرارتی به کار می‌رود، استریلیزاسیون است. این فرآیند شامل استفاده از حرارت در دما و زمان خاص، جهت از بین بردن اسپورهای بیماری‌زا در محصول غذایی است. در صنعت کنسرو، این فرآیند معمولا با استفاده از بخار برای گرم کردن غذا تا یک دمای مشخص و سپس نگهداری غذا در آن دما برای یک بازه زمانی کافی، به‌منظور نابودی میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود. در استریلیزاسیون حرارتی، معمولا دو روش اعمال می‌شود، ناپلشت کردن[۴] که در آن محصول غذایی قبل از بسته‌بندی استریل می‌شود و روش دیگر قوطی کردن[۵] است که در آن محصول در درون ظرف، بسته‌بندی شده و سپس

۱ و ۲– به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی و دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران
(*– نویسنده مسئول: Email: n.zamindar@khuisf.ac.ir)
۳– دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.78801.1205

4- Aseptic
5- Canning

استریل می‌شود (Farid & Abdul Ghani, 2004; Dash *et al.*, 2022). قوطی‌های کنسرو پس از تولید باید برای مدت‌های طولانی قابل نگهداری باشند. برای این منظور دما و زمان سالم‌سازی باید تا حدی باشد که مقاوم‌ترین میکروارگانیسم‌های احتمالی موجود در محتوای قوطی‌ها نابود شوند. در کنسروسازی زمان و دمای استریلیزاسیون بر اساس مقاومت دمایی اسپور کلستریدیوم بوتولینوم[1] محاسبه می‌شود. اما به‌طور کلی زمان، درجه حرارت پخت و استریلیزاسیون در مورد هر محصول و هر نوع بسته لازم است جداگانه مورد محاسبه قرار گیرد (Abdul Ghani *et al.*, 2002). مدت زمان لازم برای استریلیزاسیون محصول به ویژگی‌های محصول، نوع و اندازه بسته و نحوه قرارگیری در اتوکلاو و محیط حرارتی بستگی دارد (Abdul Ghani *et al.*, 1999). فرایند استریلیزاسیون علاوه بر بهبود عمر انبارمانی غذا و ایمن ساختن آن از طریق تخریب میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، می‌تواند بر کیفیت تغذیه‌ای محصول از جمله ویتامین‌های آن اثر داشته باشد. بنابراین یکی از چالش‌های فرایند استریلیزاسیون کنسروها، تولید محصولی سالم، ایمن و در عین حال دارای کیفیت تغذیه‌ای مطلوب است (Abdul Ghani *et al.*, 2002). حرارت اضافی بر کیفیت و ارزش تغذیه‌ای محصول اثر منفی می‌گذارد. تخمین سرعت انتقال حرارت برای رسیدن به شرایط بهینه فرایند و بهبود کیفیت محصول ضرورت دارد. درک و فهم بهتر فرایند حرارتی منجر به بهبود انجام فرایند، صرفه‌جویی در مصرف و ذخیره انرژی می‌شود (Abdul Ghani 1999; Fadavi *et al.*, 2018). بنابراین باید مطالعاتی در راستای مدل‌سازی، پیش‌بینی و تعیین الگوی حرارت‌دهی مواد غذایی، در طی فرآیند حرارتی صورت گیرد، تا بتوان طراحی بهتری برای فرآیند استرلیزاسیون داشت. به این منظور از علم دینامیک سیالات محاسباتی[2] به‌عنوان ابزاری قدرتمند استفاده می‌شود. دینامیک سیالات محاسباتی روشی برای شبیه‌سازی، جهت حل مسائل جریان سیال و انتقال حرارت است که در آن معادله پیوستگی، معادله ممنتوم و معادله بقای انرژی به‌صورت عددی حل می‌شوند تا سرعت، دما، برش[3]، فشار و دیگر پارامترهای موجود در یک سیستم جریان سیال پیش‌بینی شوند (Norton & Sun, 2006; Narsaiah *et al.*, 2021; Cevik & Icier, 2021). فرآیند تشکیل مالت شامل جوانه زدن دانه‌های سالم جو، تحت شرایط خاص از نظر دما، رطوبت و زمان مشخص می‌باشد. به‌نحوی‌که اندوسپرم دانه (تأمین کننده رشد جوانه است)، تحت واکنش‌های بیوشیمیایی و تجزیه آنزیمی قرار می‌گیرد. در این حالت دانه‌ها منبع سرشاری از کربوهیدرات‌ها، پرتئین‌های تجزیه شده، انواع ویتامین‌های گروه ب و آنزیم‌ها بویژه آنزیم‌های تجزیه کننده نشاسته هستند. عصاره‌ی مالت فرآورده‌ای است که از تبخیر و تغلیظ عصاره‌های آبی دانه‌های غلات خصوصا جو که فرآیند تشکیل مالت را گذرانده، بدست می‌آید (ISIRI NUMBER 6960). این محصول به‌طور گسترده در صنایع غذایی و همچنین دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده عمده از مالت تولیدی در جهان در صنعت آبجوسازی است. با توجه به اینکه کار با بسته‌های آلومینیومی نیمه‌سخت راحت است و از آنجایی که بسته‌های خالی از این نوع به راحتی در یکدیگر فرو می‌روند، فضای کمی را اشغال می‌کنند و بنابراین حمل و نقل آن‌ها آسان است لذا در این تحقیق از بسته‌های نیمه‌سخت با پایه آلومینیوم برای کنسرو کردن استفاده شد. با توجه به اینکه بسته‌های آلومینیومی نیمه‌سخت اخیراً به بازار مصرف معرفی شده‌اند، اطلاعات کمی در مورد نحوه توزیع دما در طول استریلیزاسیون آن‌ها وجود دارد. در این پژوهش با توجه به ویژگی‌های ترموفیزیکی اندازه‌گیری شده و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مدلی ریاضی برای توصیف انتقال حرارت در بسته‌های آلومینیومی نیمه سخت در طی فرایند حرارتی عصاره مالت به‌عنوان تابعی از دمای اتوکلاو توسعه داده شد و پروفیل‌های دما، شدت فرآیند حرارتی و کندترین ناحیه حرارتی[4] قوطی پیش‌بینی شد. سپس داده‌های پیش‌بینی شده بوسیله مدل با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد تا اعتبار مدل بررسی گردد.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه

در این پژوهش عصاره مالت با درجه بریکس ۶۰ تهیه شده در کارخانه به مالت شهرکرد، جهت مدل‌سازی فرآیند انتقال حرارت مورد استفاده گرفت.

تجزیه شیمیایی نمونه

تجزیه شیمیایی عصاره مالت شامل اندازه‌گیری پروتئین به روش کلدال، چربی به روش ورنر، محتوای خاکستر و رطوبت (ISIRI NUMBER 3897)، کربوهیدرات (Loewus, 1952) و محتوای فیبر خام در سه تکرار انجام شد.

تعیین خواص ترموفیزیکی

چگالی

جرم حجمی عصاره مالت در محدوده دمایی ۲۵°C تا ۸۰°C در سه تکرار اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری چگالی نمونه مورد نظر به‌دلیل

1- *Clostridium botulinum*
2- Computational Fluid Dynamics (CFD)
3- Shear
4- Slowest Heating Zone

لزجت بالا و محبوس شدن هوا در آن، نمونه‌ها به‌مدت ۲ ساعت تحت خلأ قرار گرفتند (Vatankhah *et al.*, 2015).

لزجت

اندازه‌گیری لزجت نمونه توسط ویسکومتر بروکفیلد مدل DV-III ULTRساخت آمریکا در بازه‌های ۱۰ درجه‌ای از ۳۰°C تا ۸۰°C انجام شد (Razavi & Akbari, 2012).

گرمای ویژه

گرمای ویژه نمونه با استفاده از روابط تجربی ارائه شده توسط چوی و اوکوس و معادله (۱) که بر پایه درصد اجزای تشکیل دهنده نمونه است در محدوده دمایی ۳۰°C تا ۸۰°C محاسبه شد (Sahin & Sumnu, 2006).

$$C_p = \sum_{i=1}^{n} C_{pi} x_i^w \qquad (۱)$$

در این معادله Cpi گرمای ویژه جزء سازنده i در فشار ثابت و x_i جزء جرمی ماده سازنده i است.

ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی نمونه با استفاده از روابط تجربی ارائه شده توسط چوی و اوکوس و معادلات ۲ و ۳ در بازه دمایی ۳۰°C تا ۸۰°C محاسبه شد.

$$X_i^v = \frac{x_i^w/\rho_i}{\sum_{i=1}^{n}(x_i^w/\rho_i)} \qquad (۲)$$

$$k_{pa} = \sum_{i=1}^{n} k_i X_i^v \qquad (۳)$$

در معادلات فوق X_i^v کسر حجمی جزء i ام، X_i^w کسر جرمی جزء i ام و ρ_i چگالی جزء i ام (kg/m^3) است.

حل مسئله با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت

برای بررسی عددی و توصیف انتقال حرارت در کنسرو، ابتدا هندسه ظرف توسط نرم‌افزار گمبیت طراحی و توسط همین نرم‌افزار شبکه‌بندی شد. پس از فراخوانی فایل شبکه‌بندی شده در نرم‌افزار (فلوئنت) حل مسئله انجام شد.

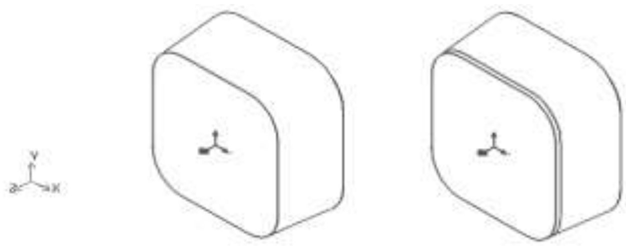
طراحی هندسه مدل

در این مطالعه دو مدل هندسی دارا و فاقد سرفضا طراحی شد. لازم به ذکر است منظور از مدل فاقد سرفضا این است که در طراحی مدل سازی انتقال حرارت در نرم‌افزار، فقط بخش ماده غذایی در نظرگرفته شد و بخش سرفضا برای مدلسازی لحاظ نشد و شرایط مرزی در بخش فوقانی ماده غذایی مشابه شرایط دیواره جانبی درنظر گرفته شد.

در طراحی مدل ابتدا یک مربع به ضلع ۸/۶۰cm رسم شد و در فواصل ۲cm از گوشه‌های آن کمان‌هایی در نظر گرفته شد، سپس قسمت‌های اضافی حذف شده و خطوط موجود به صفحه تبدیل شد. سپس صفحه ایجاد شده در راستای منفی محور Z به اندازه ارتفاع ظرف (۴/۱۵cm) و با زاویه ۵ درجه گسترش داده شد. در طراحی مدل دارای سرفضا مراحل بیان شده جهت طراحی سرفضا با ارتفاع ۰/۴cm انجام شد و سپس شکل ایجاد شده در راستای منفی محور Z به اندازه ارتفاع ظرف (۳/۷۵cm) و با زاویه ۵ درجه گسترش داده شد تا شکل هندسی ظرف مطابق شکل ۱ بدست آید.

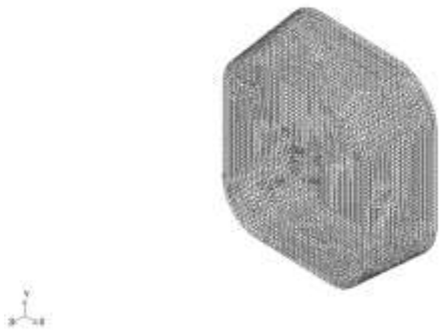
شبکه‌بندی

فضای محاسباتی باید شبکه‌بندی شود تا نرم‌افزار تحلیل‌گر بتواند برای واحدهای حاصل، حل عددی انجام دهد. به‌منظور شبکه‌بندی مدل، ابتدا شبکه‌بندی روی سطوح و سپس شبکه‌بندی روی حجم صورت گرفت. در طراحی مدل یک بار از شبکه‌بندی ۰/۱ cm و بار دیگر ۰/۲ cm استفاده شد. شکل ۲ مدل شبکه‌بندی شده با اندازه شبکه ۰/۲cm را نشان می‌دهد.



شکل ۱- شکل هندسی ظرف (سمت راست: دارای سرفضا، سمت چپ: فاقد سرفضا)

Fig. 1. Semi-rigid aluminum container geometry (Right: with head space, Left: without head space)



شکل ۲- مدل شبکه بندی شده با اندازه شبکه ۰/۲ cm
Fig. 2. Ted/Hybrid meshes on 3D model of the container (0.2 cm)

تعیین مرزها در نرم‌افزار گمبیت

در این مرحله کلیه مرزها و نوع مواد از نظر سیال یا جامد بودن در نرم‌افزار گمبیت تعریف شد و در انتها مدل طراحی شده بصورت فایل شبکه‌بندی شده به نرم‌افزار تحلیل‌گر (فلوئنت) ارسال شد. مسئله مورد نظر به‌صورت حل با دقت دو برابر و در حالت سه بعدی حل شد.

خواندن و بررسی شبکه

مدل طراحی شده نهایی پس از فراخوانی در نرم‌افزار تحلیل‌گر (فلوئنت) ابتدا مورد بررسی کیفی[1] قرار گرفت. با توجه به اینکه هندسه مسئله در مقیاس سانتی‌متر تعریف شده است، تمامی مقیاس‌های مورد استفاده بر حسب واحد سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول‌بندی حل مسئله و تعریف معادلات حاکم

در حل مسئله از شیوه پیوسته ضمنی استفاده شد. معادلات حاکم با شرایط فشار پایه[2]، به‌صورت ضمنی[3]، در حالت گذرا[4] و معادلات ضمنی درجه دو حل شدند. مدل فیزیکی مورد نظر بر پایه جریان آرام[5] پایه‌گذاری شده است. به‌منظور بررسی انتقال حرارت معادلات انرژی[6] فعال شدند. شتاب ثقل برای محور Y، m/s^2 ۹/۸- در نظر گرفته شد.

تعیین خواص ترموفیزیکی

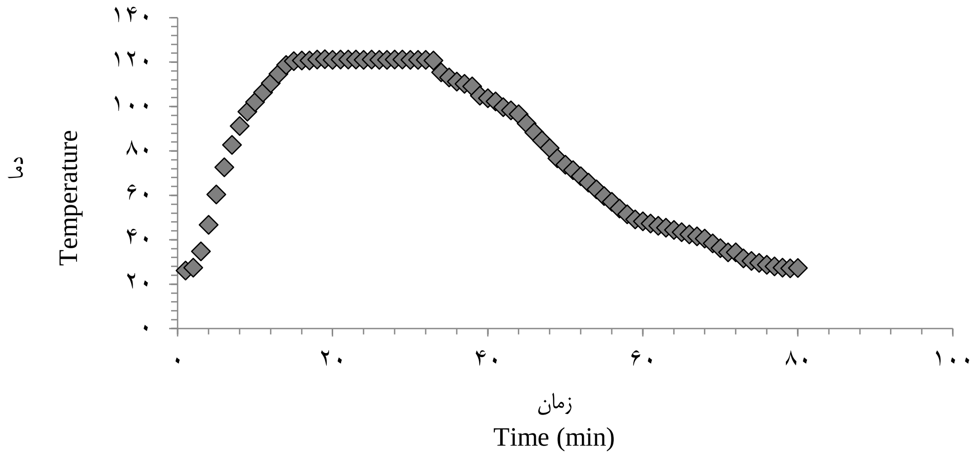
خصوصیات ترموفیزیکی اندازه‌گیری شده نمونه و خصوصیات ظرف در بانک اطلاعات نرم‌افزار تعریف و ذخیره شد.

تعیین شرایط مرزی و اولیه

شرایط مرزی[7] با توجه به شرایط واقعی اعمال شده بر دیواره‌های ظرف، در نرم‌افزار تعریف شد. به این صورت که برای دیواره‌های جانبی، درب و کف ظرف ویژگی‌های ممنتوم به صورت دیواره ثابت[8] و ویژگی-های برش به‌صورت بدون لغزش[9] در نظر گرفته شد. شرایط مرزی حرارتی مربوط به مدل فاقد سرفضا؛ برای دیواره‌های جانبی، کف و درب ظرف به صورت دمای ثابت و منطبق با پروفیل حرارتی محیط داخلی اتوکلاو (مطابق با شکل ۳) تعریف گردید. شرایط مرزی حرارتی مربوط به مدل دارای سرفضا؛ برای دیواره‌های جانبی و کف ظرف مشابه مدل فاقد سرفضا در نظر گرفته شد. اما با توجه به در نظر گرفتن سرفضا در این مدل؛ شرایط مرزی حرارتی برای قسمت فوقانی (درب) ظرف به صورت انتقال حرارت از نوع همرفت و براساس ضریب همرفت بخار تعریف گردید. خصوصیات مربوط به ظرف نیز براساس جنس آلومینیوم و با ضخامت دیواره ۰/۰۴ cm تعریف شد. شرایط اولیه همان دمای اولیه محصول در نظر گرفته شد.

جهت دستیابی به همگرایی بهتر؛ فاکتورهای مادون رهایی[10] کوچکتر یا مساوی یک در نظر گرفته شد. همچنین فشار؛ استاندارد، معادلات انرژی و ممنتوم از نوع درجه دو بالا دست[11] و الگوریتم مربوط به کوپل سرعت–فشار، سیمپل سی[12] انتخاب شد. پس از آن دیواره‌های ظرف به‌عنوان نقطه شروع محاسبات تعریف و در نهایت حل مسئله راه اندازی شد. مقادیر همگرایی برای باقیمانده‌های پیوستگی و سرعت در راستای محورهای X و Y و Z مقدار 10^{-3} و برای انرژی 10^{-8} در نظر گرفته شد (Vatankhah *et al.*, 2015).

1- Check/Grid
2- Pressure based
3- Implicit
4- Unsteady
5- Laminar
6- Energy Equations
7- Boundary condition
8- Stationary wall
9- No slip
10- Under relaxation
11- Second order upwind
12- SIMPLEC



شکل ۳- تغییرات دمای اتوکلاو در طول زمان در فرآیند حرارتی عصاره مالت

Fig. 3. Changes of retort temperature vs. time in the thermal processing of malt extract

انجام فرآیند حرارتی به‌منظور معتبرسازی مدل

در این مرحله از تحقیق، معتبرسازی پیش‌بینی‌های تئوری توزیع دما طی فرآیند حرارتی مورد آزمایش قرار گرفت. ظرف مورد نظر با وزن استاندارد از نمونه پر و توسط ماشین آلکان[1] با المنت حرارتی ۲۸۰°C دربندی شد، ترموکوپل برای اندازه‌گیری توزیع دما در مرکز هندسی ظرف مورد نظر قرار گرفت. ترموکوپل بوسیله کابل‌های PT۱۰۰ به دیتالاگر[2] دستگاه ایلب[3] متصل و ظرف در داخل اتوکلاو قرار گرفت. اطلاعات دما و زمان در فواصل یک دقیقه‌ای از طریق نرم‌افزار E-Val ثبت شد. کلیه مراحل معتبرسازی در کارخانه صنایع غذایی چیکا سپاهان واقع در اصفهان، شهرک صنعتی مبارکه انجام شد.

معتبرسازی مدل و ارزیابی خطا

معتبرسازی مدل براساس مقایسه میانگین داده‌های حاصل از تکرارهای آزمایشگاهی (از طریق نصب ترموکوپل در داخل ظرف و ثبت اطلاعات دما در طول فرآیند حرارتی به‌دست آمدند) با داده‌های پیش-بینی شده توسط نرم‌افزار از طریق آزمون t انجام گرفت. میزان ریشه مربعات میانگین خطا[4] نیز به‌عنوان معیاری برای برازش از طریق معادله (۴) محاسبه شد (Erdogdu & Tutar, 2012).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(T_{exprimental} - T_{simulation})^2} \quad (۴)$$

پایین بودن مقدار ریشه مربعات میانگین خطا نشانگر اعتبار بالای مدل است (Simpson *et al.*, 2004; Mohamed, 2007).

محاسبه ارزش استریل‌کنندگی

در مورد غذاهای کنسروی کمترین pH ممکن جهت رشد میکروارگانیسم کلستریدیوم بوتولینیوم ۴/۶ است. اسپور این میکروارگانیسم دارای بالاترین میزان مقاومت گرمایی در میان میکروب‌های غذایی بیماری‌زا است. برای انجام فرآیند حرارتی استریلیزاسیون جهت غذاهای کم اسید (دارای pH بالای ۴/۶) فرآیند حرارتی می‌باید به گونه‌ای باشد که احتمال حضور اسپور کلستریدیوم بوتولینیوم را به 10^{-12} در هر بسته برساند. برای محاسبه میزان ارزش استریل کنندگی از معادله (۵) استفاده شده است.

$$F = \int_0^t 10^{(T-T_{ref}/z)}dt \quad (۵)$$

میزان دمای مرجع (T_{ref}) با توجه به دمای اتوکلاو یا دمای پیش بینی شده توسط مدل برابر ۱۲۱/۱°C و Z برابر با ۱۰°C در نظر گرفته شد (Nicolai *et al.*, 2001).

بحث و نتایج

آنالیز شیمیایی ترکیبات تشکیل دهنده عصاره مالت در جدول ۱ ارائه شده است.

1- Alcan machine
2- Data logger
3- Ellab
4- Root means square error

جدول ۱- آنالیز شیمیایی عصاره مالت

Table 1- Chemical analysis of malt extract

آب Water	کربوهیدرات Carbohydrate	پروتئین Protein	چربی Fat	خاکستر Ash	فیبرخام Crude Fiber
41.10±0.2g	52.80±0.01g	3.62±0.01g	1.5±0.001g	0.98±0.2g	ناچیز insignificant

خواص ترموفیزیکی

به‌منظور افزایش تأیید مدل پیش‌بینی شده، خواص ترموفیزیکی نمونه به‌عنوان تابع دما اندازه‌گیری شد. ضریب انبساط حجمی (β) $۳/۹۶\times ۱۰^{-۴}$ برآورد شد. معادلات (۶)، (۷)، (۸) و (۹) به‌ترتیب تغییرات چگالی، گرمای ویژه، هدایت حرارتی و لزجت را به‌عنوان توابعی از دما نشان می‌دهند.

$$\rho = -0.0059T^2 + 0.1068T + 1287.6 \quad (۶)$$

$$C_P = 9.575T + 2679.6 \quad (۷)$$

$$k = 0.0009T + 0.4107 \quad (۸)$$

$$\mu = 61.224T^{-1.636} \quad (۹)$$

بررسی روند همگرایی در مدل انتقال حرارت در کنسرو عصاره مالت

بررسی تغییرات دما در بازه‌های زمانی متوالی بر نقطه واقع بر محور مختصات به ارتفاع ۲/۷۶ از سر ظرف نشان داد که دما در نقطه مذکور به‌صورت تابعی از دمای اتوکلاو ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد. به منظور کنترل روند همگرایی مسئله باقیمانده‌های انرژی[1] شکل ۴ و تغییرات دما در بازه‌های زمانی متوالی بر نقطه مذکور بررسی شدند که هر دو مهر تأییدی بر همگرا شدن مسئله هم از نظر باقیمانده‌های انرژی و هم از نظر روال منطقی تغییرات دما بود.

بررسی اثر شبکه‌بندی متفاوت بر مدل انتقال حرارت در کنسرو عصاره مالت

در مدل طراحی شده از دو شبکه‌بندی ۰/۱cm و ۰/۲cm جهت حل مسئله استفاده شد. دمای محل هندسی قرارگیری ترموکوپل به مختصات (۲/۷۶ و۰ و۰) تا پایان مرحله نگهداری[2] توسط مدل در دو شبکه‌بندی ۰/۱cm و ۰/۲ cm شبیه‌سازی شد. و توسط آزمون آماری t مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بدست آمده، عدم وجود اختلاف معنی-دار در سطح احتمال ۱٪ را نشان داد. با توجه به نتیجه بدست آمده به منظور ساده‌سازی روند حل و جلوگیری از اتلاف وقت از شبکه‌بندی ۰/۲cm در ادامه روند تحقیق استفاده شد.

بررسی پروفایل‌های حرارتی در مدل عصاره مالت در مقاطع زمانی مختلف

پروفیل حرارتی در سطح Y=۰ و Z= −۲/۷۶ cm (از سر ظرف) به صورت همدما در طول فرآیند حرارتی (حرارت‌دهی و خنک کردن) در مدل فاقد سرفضا در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است دما در داخل ظرف کنسرو بصورت تابعی از دمای اتوکلاو ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد در مراحل اولیه فرآیند، انتقال حرارت بیشتر به صورت هدایت بوده و فرآیند جابجایی نقش کمتری دارد (الف و ب) و سپس وارد مرحله گذار از هدایت به جابجایی شده (د و ج) و در ادامه فرآیند مکانیسم غالب در انتقال حرارت جابجایی است (ه و و).

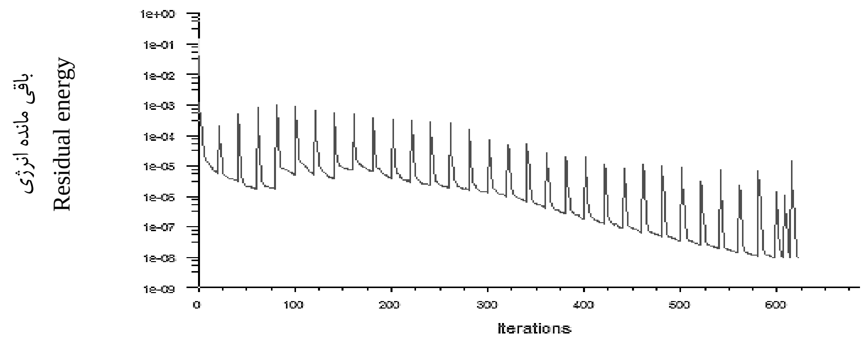
بررسی اثر سر فضای ظرف کنسرو در مدل‌های پیش‌بینی شده

با توجه به این نکته که در شرایط آزمایشگاهی تمامی ظروف پر شده از عصاره مالت دارای سرفضا[3] بودند، تأثیر سرفضا بر سرعت انتقال حرارت بررسی شد. در این مطالعه ۰/۴cm سرفضا در بخش فوقانی تمامی ظروف در نظر گرفته شد. از آزمون آماری t جهت مقایسه دمای محل قرارگیری ترموکوپل در ظرف (۲/۷۶− و۰ و۰) برای مدل دارای سرفضا نسبت به مدل فاقد سرفضا استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ بین دو مدل بود. شکل ۶ پروفیل دما در سطح Y=۰cm را در مقاطع زمانی مختلف در دو مدل دارا و فاقد سرفضا نشان می‌دهد. همچنین از آزمون آماری t جهت بررسی تأثیر شبکه‌بندی بر دمای نقطه انتخابی استفاده شد، که نتایج حاکی از عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین شبکه‌بندی ۰/۱cm و ۰/۲cm در سطح احتمال ۱٪ بود.

1- Energy residual
2- Holding
3- Head space

بررسی ناحیه کند حرارتی در مدل عصاره مالت

در انتقال حرارت به‌صورت هدایت ناحیه کند حرارتی که کمترین میزان حرارت را دریافت می‌کند، غالبا در مرکز هندسی توده غذایی قرار دارد. ولی مطالعات زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد در غذاهایی که فقط از طریق همرفت گرم می‌شوند، ناحیه کند حرارتی در مرکز هندسی قوطی قرار نمی‌گیرد، بلکه در بخشی نزدیک به کف قوطی قرار می گیرد. این مسئله هم به‌صورت تجربی و هم با مدل‌سازی کامپیوتری اثبات شده است (Abdul Ghani *et al.*, 1999; Farid & Abdul Ghani, 2004). به‌صورت تجربی و تئوری مشخص شده است که در غذاهایی که حرارت در آن‌ها تنها به‌صورت همرفت منتقل می‌شود، محل ناحیه کند حرارتی تغییر می‌کند (Abdul Ghani *et al.*, 2002). با پیشرفت زمان حرارت‌دهی ناحیه کند حرارتی به سمت پایین بسته حرکت کرده و در ارتفاع ۳۰٪ تا ۴۰٪ نسبت به کف بسته قرار می‌گیرد. همچنین با پیشرفت زمان حرارت‌دهی دمای یکنواخت‌تری در بسته به وجود می‌آید و نیروهای جابه‌جا کننده سیال کم می‌شود. در نتیجه سرعت جابجایی کم شده و در پایان حرارت دهی جریان چرخشی متوقف می‌شود (Abdul Ghani *et al.*, 1999). برای بررسی ناحیه کند حرارتی و مشخص کردن محل آن، برش‌هایی از سطح Y=۰cm در مقاطع زمانی مختلف در دو حالت دارای سر فضا و فاقد سرفضا مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶).



شکل ٤- باقیمانده انرژی در t = ۳۲ min

Fig. 4. Energy residuals at t=32 min

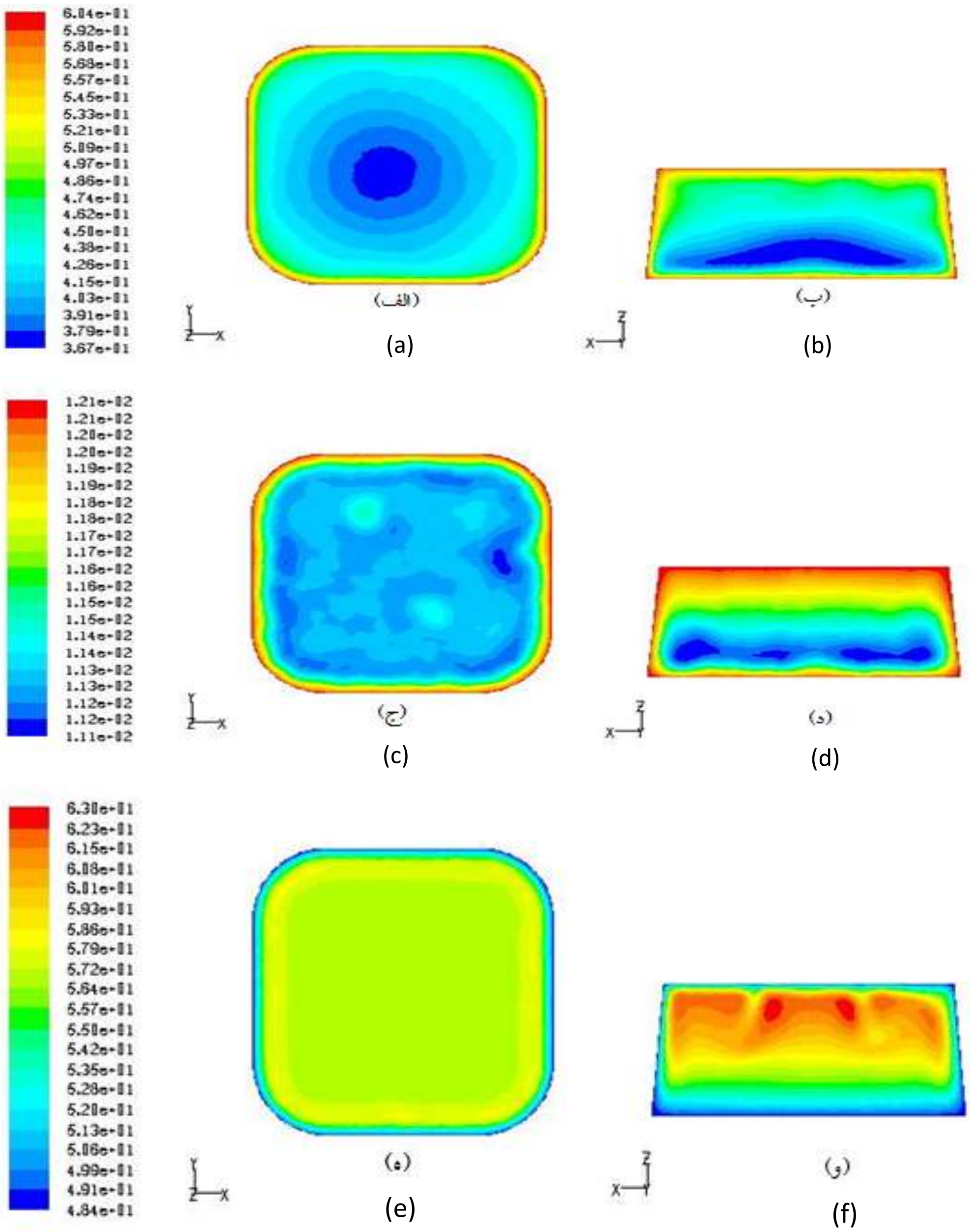
خطوط هم‌دمای مربوطه نشانگر این مطلب بود که اگر چه اندکی تغییر در ارتفاع و شکل محل قرارگیری ناحیه کند حرارتی در هر دو مدل دارا و فاقد سرفضا در مراحل مختلف فرآیند گرمایی مشاهده می‌شود اما در تمام مراحل فرآیند گرمایی این ناحیه متمایل به یک سوم انتهایی ظرف بوده و محل آن ثابت است. بجز در مراحل انتهایی فرآیند که این ناحیه متمایل به نیمه بالایی ظرف کنسرو است. در شکل ۵ برش‌هایی از سطح Z= −۲/۷۶cm نشان داده شد. همانطور که مشاهده می‌شود محل و شکل ناحیه کند حرارتی در سطح Z= −۲/۷۶cm در طول فرآیند تغییر می‌کند. به‌طوری‌که در ابتدای فرآیند حرارتی ناحیه‌ای کوچک نزدیک به مرکز مقطع را شامل می‌شود که این نشانگر غالب بودن هدایت حرارتی در این مرحله از فرآیند است و در انتهای فرآیند حرارتی (مرحله سرد کردن) ناحیه کند حرارتی به دیواره‌های ظرف کنسرو متمایل می‌شود. داده‌های حاصل مربوط به تمامی گره‌ها در پایان مرحله هلدینگ، به‌صورت فایل اکسل[1]، از نرم‌افزار فلوئنت استخراج شد. نتایج بیانگر این نکته است که ناحیه کند حرارتی مدل طراحی شده کنسرو عصاره مالت دارای سرفضا در پایان مرحله حرارت دهی در محدوده −۳/۳۷<Z<−۳/۲۷cm، −۱<Y<۰/۳cm، −۰/۰۲<X<۰/۸cm و ناحیه کند حرارتی مدل عصاره مالت فاقد سرفضا در پایان مرحله حرارت‌دهی در محدوده −۳/۴۶<Z<−۳/۰۵cm، −۳/۴۴<Y<۰/۴۸cm، −۳/۵۸<X<۳/۷۶cm است. داده‌های حاصل نشان داد ارتفاع ناحیه کند حرارتی در هر دو مدل دارا و فاقد سر فضا دارای مشابهت قابل قبول هستند.

بررسی اطلاعات دما و زمان در مدل عصاره مالت

در شکل ۷ نمودار تغییرات دما- زمان محل قرارگیری ترموکوپل برای مدل شبیه‌سازی شده و مدل تجربی ارائه شده است.

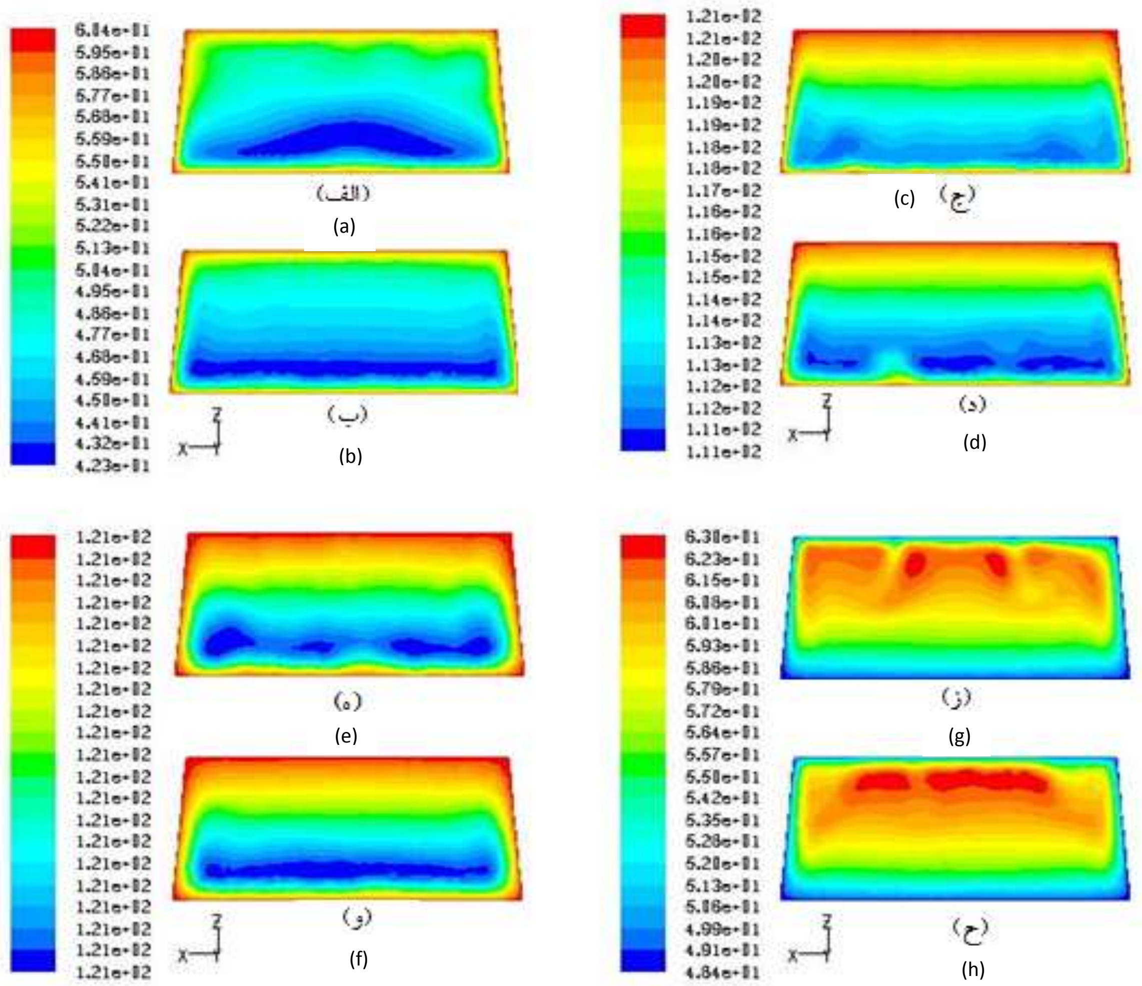
همچنین نمودار محاسبات ارزش استریلیزاسیون نسبت به زمان در نقطه انتخابی در مدل پیش‌بینی شده عصاره مالت دارای سرفضا و مقدار آزمایشگاهی در شکل ۸ نشان داده شده است.

1- Microsoft Excel



شکل ۵- پروفیل دما در مدل فاقد سر فضا در سطح Z= -۲/۷٦cm در (الف) t=۵ min، (ج) t=۳۲ min، (ه) t=٦۰ min و در سطح Y =۰cm در (ب) t=۵ min، (د) t=۳۲ min ، (و) t=٦۰ min

Fig. 5. Temperature contour in model without head space in Z= -2.76 surfaces (a) at t = 5 (min); (c) at t = 32 (min); (e) at t = 60 (min) and in Y=0 surfaces (b) t = 5 (min); (d) t = 32 (min); (f) t = 60 (min)

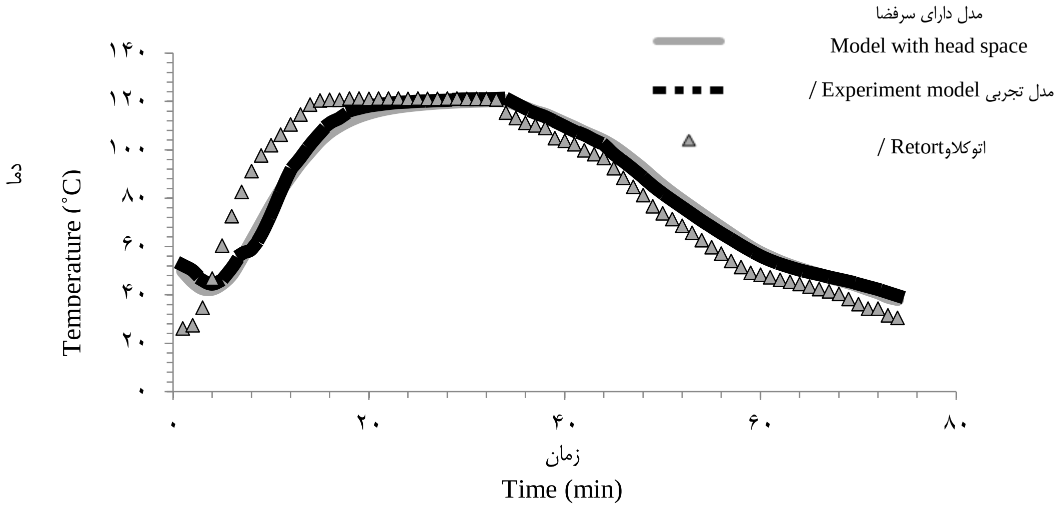


شکل ٦- پروفیل دما در سطح Y=۰cm (الف) مدل بدون سرفضا، (ب) مدل با سرفضا در t=۵min؛ (ج) مدل بدون سرفضا، (د) مدل با سرفضا در t=۱٦ min؛ (ه) مدل بدون سرفضا، (و) مدل با سرفضا در t=۳۲min ؛ (ز) مدل بدون سرفضا، (ح) مدل با سرفضا در t=٦۰min

Fig. 6. Temperature contour in y=0 surfaces (a) Model without head space (b) Model with head space at t = 5 (min); (c) Model without head space (d) Model with head space at t = 16 (min); (e) Model without head space (f) Model with head space at t = 32 (min); (g) Model without head space (h) Model with head space at t = 60 (min)

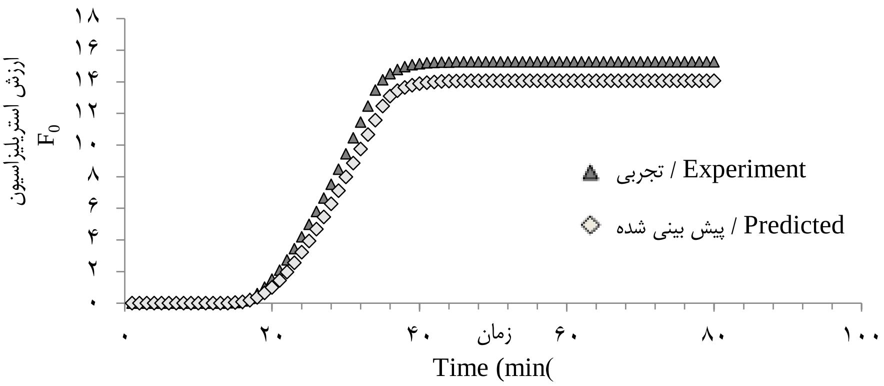
معتبرسازی مدل

معتبرسازی مدل براساس مقایسه میانگین داده‌های حاصل از تکرارهای آزمایشگاهی (از طریق نصب ترموکوپل در داخل ظرف و ثبت اطلاعات دما در طول فرآیند حرارتی به‌دست آمدند) با داده‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار از طریق آزمون t انجام گرفت. نتایج این مقایسه برای مرحله گرم کردن و سرد کردن به‌ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از مدل دارای سرفضا و مدل فاقد سرفضا نشان داد اختلاف معنی‌دار بین دو مدل طراحی شده در سطح احتمال یک درصد وجود ندارد. اما داده‌های دمایی حاصل از مدل دارای سرفضا مطابقت دقیق‌تری با داده‌های تجربی داشتند. مقدار میانگین ریشه مربعات خطا مربوط به مدل دارای سرفضا در مقایسه با داده‌های تجربی برابر با ۲/۲۱ بود.



شکل ۷- نمودار دما در محل هندسی قرارگیری ترموکوپل در مدل تجربی و مدل شبیه‌سازی شده دارای سرفضا در عصاره مالت و نمودار دما در محیط اتوکلاو

Fig. 7. Predicted and experiment temperature at the sensor position for model with head space and retort temperature



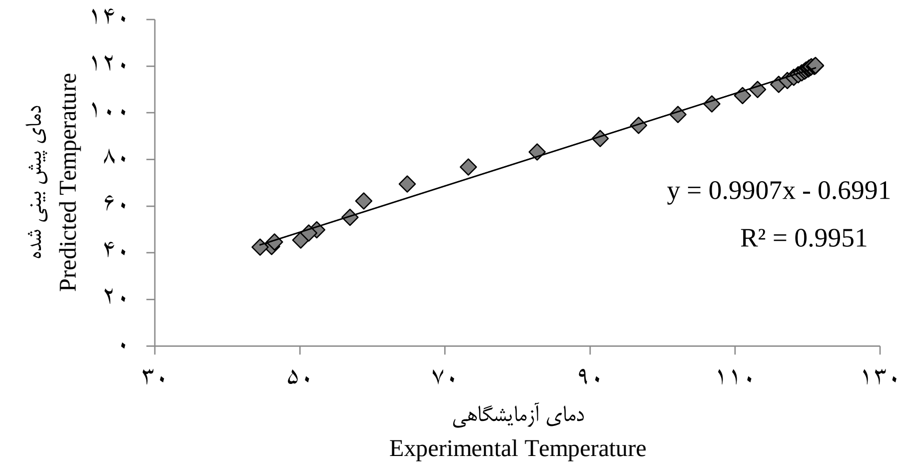
شکل ۸- F_0 در مدل پیش‌بینی شده و تجربی دارای سرفضا

Fig. 8. The F_0 in the predicted and experiment model with headspace

بهینه‌سازی و تصحیح ارزش پاستوریزاسیون

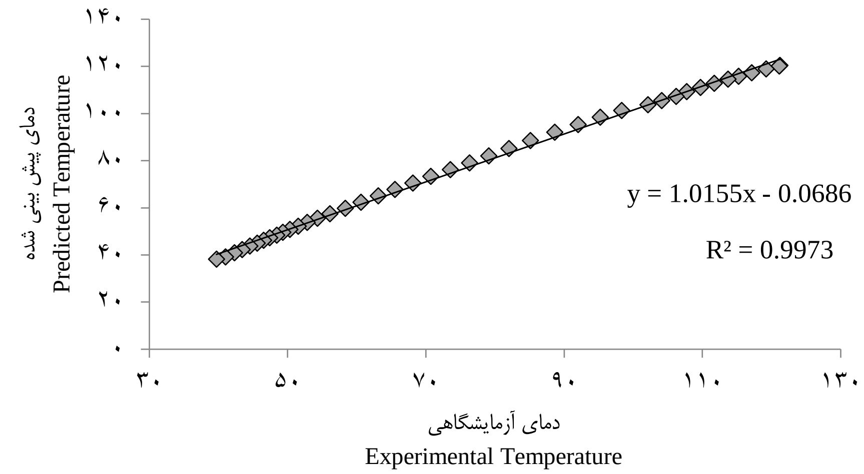
با توجه به عدم وجود F_0 استاندارد برای کنسرو عصاره مالت می‌توان این محصول را با محصولات مشابه به لحاظ ترکیب شیمیایی، بافت و pH مورد مقایسه قرار داد. در این پژوهش میکروارگانیسم *کلستریدیوم بوتولینوم* به‌عنوان میکروب شاخص در نظر گرفته شد. با توجه به وجود هماهنگی تقریبی بین محتوای شیر تغلیظ شده و ترکیبات عصاره مالت به‌نظر می‌رسد F_0=۵ min برای محصول مناسب باشد (Brennan, 1979). با توجه به اینکه در فرآیند استریلیزاسیون از سیکل‌های حرارتی تعریف شده برای محصولات کارخانه چیکا استفاده شد، میزان F_0 محاسبه شده (۱۵/۲۷) بیش از میزان مورد نیاز برای عصاره مالت بود و با توجه به اینکه میزان F_0 اعمال شده سبب حرارت‌دهی بیش از حد محصول می‌شود بنابراین می‌توان از سیکل‌های حرارتی ملایم‌تر استفاده کرد و زمان حرارت‌دهی را کاهش داد. به‌منظور بهینه‌سازی میزان حرارت‌دهی عصاره مالت، پروفیل حرارتی آن، اصلاح شد. روش گرافیکی سیمپسون[1] نشان داد با کاهش ۱۱ دقیقه از زمان فرآیند در انتهای مرحله حرارت‌دهی می‌توان به نتیجه مطلوب (F_0=۵/۲۵) رسید (Simpson *et al.*, 2004; Alonso *et al.*, 2013). شکل ۱۱ نمودار تغییرات دمای محصول طی زمان را در مدل تجربی و مدل اصلاح شده نشان می‌دهد.

1- Simpson



شکل ۹- دمای پیش‌بینی شده به دمای آزمایشگاهی در مختصات (۲/۷٦- و۰ و۰) در مدل دارای سرفضا از آغاز تا پایان مرحله حرارت دهی

Fig. 10. Predicted temperature vs. experimental temperature at (0, 0, -2.76) in model with head space until the end of heating



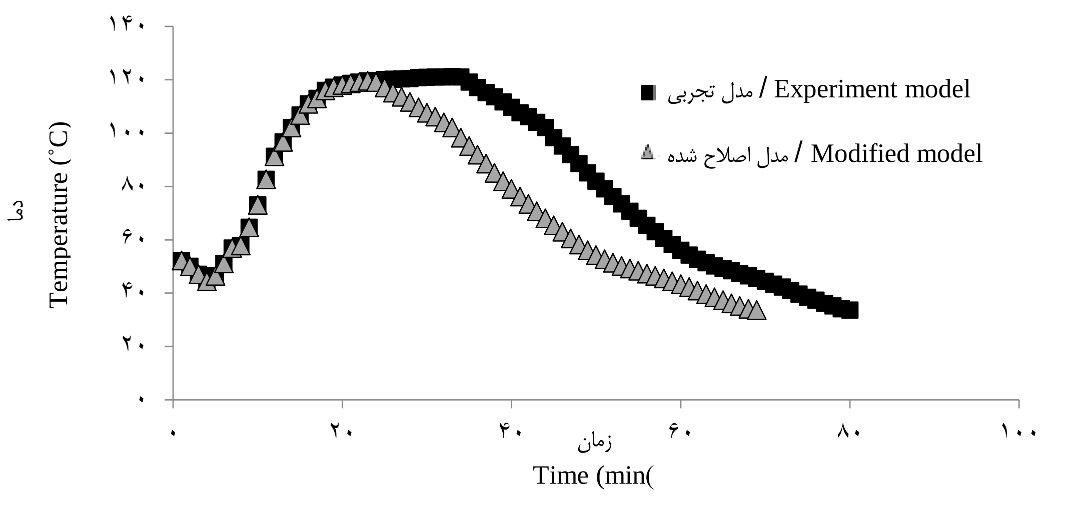
شکل ۱۰- دمای پیش‌بینی شده به دمای آزمایشگاهی در مختصات (۲/۷٦- و۰ و۰) در مدل دارای سرفضا در مرحله خنک کردن

Fig. 10. Predicted temperature vs. experimental temperature at (0, 0, -2.76) in model with head space in the cooling phase

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه یکی از چالش‌های فرایند استریلیزاسیون کنسروها، تولید محصولی سالم، ایمن و در عین حال دارای کیفیت تغذیه‌ای مطلوب است، تخمین سرعت انتقال حرارت برای رسیدن به شرایط بهینه فرایند و حفظ کیفیت محصول ضرورت دارد. همبستگی بالا بین دماهای پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، نشانگر کارآمد بودن مدل توسعه داده شده در پیش‌بینی دما در نقاط مختلف کنسرو عصاره مالت بود. همچنین با استفاده از پروفیل‌های دما در مدل، محل ناحیه کند حرارتی تخمین زده شد. اطلاعات حاصل بیانگر وجود ناحیه کند حرارتی در یک سوم انتهایی کنسرو و نشانگر وجود جریان‌های جابجایی در محصول بود. با توجه به اینکه ناحیه کند حرارتی دیرتر از سایر نقاط گرم می‌شود لذا در صورت تأمین کشندگی لازم در این ناحیه می‌توان از استریل شدن سایر نقاط اطمینان حاصل کرد. با توجه به میزان F_0 محصولات مشابه و استفاده از روش گرافیکی سیمپسون مقدار F_0 اصلاح شده در ناحیه کند حرارتی در مدل کنسرو عصاره مالت ۵/۲۵ محاسبه شد. این تحقیق برای بهینه‌سازی فرآیند استریلیزاسیون صنعتی

عصاره مالت با توجه به دما و زمان قابل استفاده است و می‌توان با توجه به نوع غذای داخل بسته و ویژگی‌های آن زمان لازم برای استریلیزاسیون را پیش‌بینی کرد. با بررسی سرعت انتقال حرارت می‌توان موقعیت ناحیه کند حرارتی را پیش‌بینی و مدت زمان لازم برای استریلیزاسیون ناحیه کند حرارتی را محاسبه کرد.



شکل ۱۱- تغییرات دمای عصاره مالت طی زمان در مدل تجربی و مدل اصلاح شده

Fig. 11. Temperature changes of malt syrup during time in the experiment and modified model

References

1. Abdul Ghani, A.G., Farid, M.M., & Chen, X.D. (2002). Numerical simulation of transient temperature and velocity profiles in a horizontal can during sterilization using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, *51*(1), 77-83. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00039-5
2. Abdul Ghani, A.G., Farid, M.M., & Chen, X.D. (2002). Theoretical and experimental investigation of the thermal inactivation of Bacillus stearothermophilus in food pouches. *Journal of Food Engineering*, *51*(3), 221-228. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00060-7
3. Abdul Ghani, A.G., Farid, M.M., Chen, X.D., & Richards, P. (1999). An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Engineering*, *42*, 207-214. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00123-5
4. Abdul Ghani, A.G., Farid, M.M., Chen, X.D., & Richards, P. (1999). Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, *41*, 55-64. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00073-4
5. Alonso, A.A., Arias-Mendes, A., Balsa-canto, E., Garsia, M.R., Molinia, J.I., Vilas, C., & Villafin, M. (2013). Real time optimization for quality control of batch thermal Sterilization prepackaged foods. *Food Control*, *32*(2), 392-403. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.01.002
6. Brennan, A. (1979). *Food engineering operations*. Applied Science. London.
7. Cevik, M., & Icier, F. (2021). Numerical simulation of temperature histories of frozen minced meat having different fat contents during ohmic thawing. *International Journal of Thermal Sciences*, *165*, 106958. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106958
8. Dash, K., Sharma, M., & Tiwari, A. (2022). Heat and mass transfer modeling and quality changes during deep fat frying: A comprehensive review. *Journal of Food Process Engineering*, *45*(4). https://doi.org/10.1111/jfpe.13999
9. Erdogdu, F., & Tutar, M. (2012). A computational study for axial rotation effects on heat transfer in rotating cans containing liquid water, semi-fluid food system and headspace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *55*, 3774–3788. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.031
10. Fadavi, A., Yousefi, S., Darvishi, H., & Mirsaeedghazi, H. (2018). Comparative study of ohmic vacuum, ohmic, and conventional-vacuum heating methods on the quality of tomato concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *47*, 225-230. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.004
11. Farid, M.M., & Abdul Ghani, A.G. (2004). A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food. *Chemical Engineering and Processing*, *43*, 523–53. https://doi.org/10.1016/j.cep.2003.08.007

12. Islamic Republic of Iran ISIRI NUMBER 3897. Barley malt extract specifications and test methods. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN.
13. Loews, F.A. (1952). Improvement in anthrone method for determination of carbohydrates. *Analytical Chemistry, 24*(1), 219. https://doi.org/10.1021/ac60061a050
14. Mohamed, I.O. (2007). Determination of an effective heat transfer coefficients for can headspace during thermal sterilization process. *Journal of Food Engineering, 79*, 1166-1171. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.015
15. Narsaiah, K., Bedi, V., Ghodki, B., & Goswami, T. (2021). Heat transfer modeling of shrimp in tunnel type individual quick freezing system. *Journal of Food Process Engineering, 44*(11). https://doi.org/10.1111/jfpe.13838
16. Nicolai, B.M., Verboven, P., & Scheerlinck, N. (2001). *Food process modeling*. PP 60-81 in: L. M. M. Tijskens and M. L. A. T. M. Hertog. The Modeling of Heat and Mass Transfer. CRC Press., Boca Rayton.
17. Norton T., & Sun, D.W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology, 17*(11), 600-620. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004
18. Razavi, M. A., & Akbari, R. (2012). *Biophysical properties of agricultural & food materials*. Mashhad Ferdowsi University, Mashhad.
19. Sahin, S., & Sumnu, S.G. (2006). *Physical Properties of Foods*. Middle East Technical University. Ankara.
20. Simpson, R., Almonasid, S., & Mitchel, M. (2004). Matyhematical model development, Experimemtal validation and processing optimization: retortable pouches packed with seafood in cone frusum shape. *Journal of Food Engineering, 63*, 153-162. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00294-2
21. Vatankhah, H., Zamindar, N., & Shahedi Baghekhandan, M. (2015). Heat transfer simulation and retort program adjustment for thermal processing of wheat based Haleem in semi-rigid aluminum containers.